3Ш

УДК 004.93:681.78

Е.В. Шаповалов, В.А. Коляда
Институт электросварки им Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев
Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11

Стереоскопическое отслеживание траектории движения горелки для сварочных тренажеров

E.V. Shapovalov, V.A. Kolyada
E.O. Paton Electric Welding Institute MAS of Ukraine, c. Kyiv
Ukraine, 03680, c. Kyiv, Bozhenko st., 11

Stereoscopic Tracking of the Torch Trajectory for Welders Trainers

Є.В. Шаповалов, В.О. Коляда
Інститут електрозварювання ім Є.О. Патона НАН України, м. Київ
Україна, 03680, м. Київ, вул. Боженка, 11

Стереоскопічне відстеження траєкторії руху пальника для зварювальних тренажерів

В статье рассмотрен способ усовершенствования существующих малоамперных дуговых тренажеров-сварщиков путем применения стереоскопического отслеживания траектории движения имитатора сварочной горелки. Применение стереоскопической системы технического зрения позволяет существенно расширить функциональность тренажеров-сварщиков за счет использования прямого метода измерения углового и линейного положения сварочного инструмента в процессе обучения или аттестации сварщиков.
Ключевые слова: тренажер-сварщик, стереоскопическая сенсорная система, математическая модель, световые маркеры, обработка изображений, измерение траектории.

This article describes a method for improving the existing low-amperage arc welder trainers by the use of stereoscopic tracking of the simulated welding torch. The use of stereoscopic vision system can significantly extend of the welder trainers functionality by using the direct measuring method of the angular and linear welding tool position in welders training or certification.
Key Words: welder trainers, stereoscopic sensor system, mathematical model, light markers, image processing, trajectory measurement.

У статті розглянуто спосіб удосконалення існуючих малоамперних дугових тренажерів-зварників шляхом застосування стереоскопічного відстеження траєкторії руху імітатора зварювального пальника. Застосування стереоскопічної системи технічного зору дозволяє істотно розширити функціональність тренажерів-зварників за рахунок використання прямого методу вимірювання кутового й лінійного положення зварювального інструмента в процесі навчання чи атестації зварників.
Ключові слова: тренажер-зварник, стереоскопічна сенсорна система, математична модель, світлові маркери, обробка зображень, вимірювання траєкторії.

Введение

В последнее время для решения задач, связанных с обучением и аттестацией специалистов по электродуговой сварке, широко применяются так называемые мало-амперные дуговые сварочные тренажеры [1]. Такие тренажеры, как правило, состоят

из малоамперного сварочного источника, имитаторов сварочных горелок разных типов, сварочных образцов, персонального компьютера и специализированного программного обеспечения. Для измерения электрических параметров сварочной дуги и углов наклона сварочного инструмента используются соответствующие датчики. Во время имитации сварочных операций регистрируются показания датчиков и по определенным методикам оцениваются качественные и количественные показатели выполнения сварки.

Тренажеры позволяют производить обучение навыкам возбуждения дуги, поддержания нужной длины дугового промежутка, необходимых углов наклона электрода, оптимальной скорости сварки, правильного теплового режима сварочной ванны, а также осуществлять совершенствование и тестирование этих навыков. Вместе с тем, большинство моделей сварочных тренажеров, которые в настоящее время выпускаются научно-производственными предприятиями Украины и России, имеют ряд недостатков, связанных с косвенным измерением некоторых параметров. Тогда как ток и напряжение сварки определяются методом прямого измерения, то, например, такой параметр как скорость сварки оценивается по изменению сварочного тока во времени, что может приводить к существенным погрешностям. Датчики угла наклона позволяют определять только угловую ориентацию горелки относительно гравитационной вертикали, то есть полная траектория движения имитатора сварочного инструмента остается неизвестной, что не позволяет контролировать такие важные параметры, как отклонения электрода от линии стыка, вылет электрода, амплитуду и частоту колебаний при имитации процесса дуговой наплавки. В данной работе для решения вышеуказанных проблем предлагается использовать стереоскопическое отслеживание траектории движения имитатора сварочной горелки по световым маркерам.

Цель работы состоит в расширении функциональности малоамперных сварочных тренажеров за счет применения прямого метода измерения пространственного положения имитатора сварочной горелки с помощью стереоскопических средств технического зрения. Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

– построение математической модели стереоскопической сенсорной системы;

– распознавание световых маркеров на изображениях стереопары;

– создание макета стереоскопической системы для отслеживания траектории движения имитатора сварочной горелки и проведение экспериментов.

Математическая модель стереоскопической сенсорной системы

Любая стереоскопическая сенсорная система содержит как минимум две видеокамеры, представляющие собой матричные устройства регистрации оптического излучения. Математическая модель матричной видеокамеры может быть представлена в виде уравнений взаимной связи между тремя системами координат: опорной системой координат, которая относится к пространству объектов, собственной системой координат видеокамеры и двумерной системой координат формируемого изображения [2]. Связь между объектом и видеокамерой определяется пространственным преобразованием в виде:

$$r = AЧr_c, \tag{1}$$

где r, r_c – векторы, которые определяют положение точки в системах координат объектов и видеокамеры соответственно; A – матрица, определяющая положение и ориентацию видеокамеры относительно опорной системы координат. Матрица $\boldsymbol{A}$ представляет собой произведение матрицы переноса начала координат и матриц поворота вокруг осей координат:

$$A = T \text{Ч} R_x \text{Ч} R_y \text{Ч} R_z \,, \tag{2}$$

где T – матрица переноса начала координат в точку с координатами (t_x, t_y, t_z); R_x, R_y, R_z – матрицы поворота вокруг осей OX, OY, OZ на углы α, β, γ соответственно.

В свою очередь, связь между видеокамерой и изображением определяется следующим перспективным преобразованием:

$$x_p = \frac{x_c}{z_c} f + \frac{W}{2}, \quad y_p = \frac{y_c}{z_c} f + \frac{H}{2}\,, \tag{3}$$

где (x_p, y_p) – координаты точки на изображении (номер столбца и строки); (x_c, y_c, z_c) – координаты точки в системе координат видеокамеры (вектор $\boldsymbol{r}_c$); f – оценка фокусного расстояния объектива видеокамеры; W, H – ширина и высота изображения в пикселях. В соотношениях (3) учитывается перенос начала координат в центр изображения. Оценку фокусного расстояния можно представить в виде зависимости от горизонтального угла зрения объектива θ и ширины изображения W:

$$f = \frac{W}{2 \cdot tg\left(\theta / 2\right)}\,. \tag{4}$$

Формулы можно записать относительно z_c в виде:

$$x_c = k_x \cdot z_c, \quad y_c = k_y \cdot z_c\,, \tag{5}$$

где $k_x = \dfrac{x_p - W/2}{f}, \quad k_y = \dfrac{y_p - H/2}{f}$.

Соответственно, соотношение (1) в однородных координатах будет иметь следующий вид:

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T = A \text{Ч} \begin{bmatrix} k_x \text{Ч} z_c & k_y \text{Ч} z_c & z_c & 1 \end{bmatrix}^T, \tag{6}$$

то есть при известных собственных и установочных параметрах видеокамеры и положении точки на изображении, ее пространственные координаты зависят только от значения z_c. К собственным параметрам видеокамеры относятся угол зрения объектива θ и размеры формируемого изображения $W \times H$, которые представляют собой заранее известные паспортные параметры. Установочные параметры представлены элементами вектора переноса системы координат (t_x, t_y, t_z) и угловыми параметрами (α, β, γ). В общем случае установочные параметры видеокамеры заранее не известны. Для их идентификации можно воспользоваться одним из способов калибровки видеокамер, таким как, например, способ с использованием плоского шаблона [3].

Если положить, что в соответствии с формулой (1) связь между объектом и второй видеокамерой стереоскопической системы определяется соотношением $r = A' \cdot r'_c$, то

$$A \text{Ч} r_c = A' \text{Ч} r'_c\,, \tag{7}$$

или на основании (6)

$$AЧ\left[k_x Чz_c \quad k_y Чz_c \quad z_c \quad 1\right]^T = A'Ч\left[k'_x Чz'_c \quad k'_y Чz'_c \quad z'_c \quad 1\right]^T. \quad (8)$$

Соотношение (8) можно представить системой уравнений в матричном виде:

$$MЧZ = b, \quad (9)$$

где $M = \begin{bmatrix} k_x a_{00} + k_y a_{01} + a_{02} & -(k_x a'_{00} + k'_y a'_{01} + a'_{02}) \\ k_x a_{10} + k_y a_{11} + a_{12} & -(k'_x a'_{10} + k'_y a'_{11} + a'_{12}) \\ k_x a_{20} + k_y a_{21} + a_{22} & -(k'_x a'_{20} + k'_y a'_{21} + a'_{22}) \end{bmatrix}$; $Z = \begin{bmatrix} z_c & z'_c \\ z_c & z'_c \\ z_c & z'_c \end{bmatrix}$; $b = \begin{bmatrix} a'_{03} - a_{03} \\ a'_{13} - a_{13} \\ a'_{23} - a_{23} \end{bmatrix}$; a_{ij}, a'_{ij} – элементы матриц A и A' соответственно.

Система (9) представляет собой переопределенную систему линейных алгебраических уравнений, которая состоит из трех уравнений с двумя неизвестными z_c и z'_c. Для решения переопределенных линейных систем целесообразно использовать обобщенный метод наименьших квадратов, который позволяет находить наиболее близкие решения с минимальной невязкой по фиксированной процедуре (без итераций).

В результате решения системы (9) определяются оценки значений z_c и z'_c, на основании которых вычисляются элементы векторов r_c и r'_c. Далее, путем подстановки r_c в формулу (1) определяется оценка пространственного положения точки r.

Таким образом, рассмотренная модель стереоскопической сенсорной системы позволяет определять пространственное положение точки, если известны координаты ее проекций на изображениях стереопары.

Распознавание световых маркеров на изображениях стереопары

Имитатор сварочной горелки можно рассматривать как прямую линию, проходящую через ось электрода. Для построения уравнения прямой линии достаточно знать координаты двух точек. Следовательно, в данном случае можно ограничиться двумя световыми маркерами.

Световые маркеры на изображениях стереопары отображаются в виде групп пикселей с более высокой интенсивностью (яркостью) по отношению к общему фону изображения (рис. 1*а*). Самым простым способом обнаружения таких объектов на изображениях является двухмерная масочная фильтрация. Вместе с тем двухмерная фильтрация цифровых изображений является достаточно ресурсоемкой операцией из-за высокой вычислительной сложности. Для расчета отклика двухмерного фильтра с маской $n\times n$ пикселей только в одной точке необходимо выполнить $2n^2$-1 арифметических операций, причем половина из них – это «тяжелые» для любого процессора операции умножения.

Для повышения производительности алгоритма обработки изображений предложено использовать одномерный согласованно-избирательный фильтр, который применяется при контурном анализе изображений. В соответствии с [4] импульсная характеристика $\lambda(n)$ согласованно-избирательного фильтра определяется следующим выражением:

$$\lambda(n) = 2s(l-n+1) - s(l-n) - s(l-n+2), \quad n = 0, 1, \ldots, l-1, \quad (10)$$

где $s(n)$ – идеализированная дискретная функция яркости в области проекций световых маркеров на изображениях; l – количество значащих отсчетов. Соответствующая функция фильтра имеет следующий вид:

$$\eta(m)=\sum_{n=0}^{l-1} f(n)\left[2s(m-l+n-1)-s(m-l+n)-s(m-l+n-2)\right], \qquad (11)$$

где $\eta(m)$ – отклик фильтра в точке строки (столбца) изображения с индексом m; $f(n)$ – дискретная функция яркости исходного изображения.

Для синтеза фильтра необходимо определить идеализированную нормированную функцию яркости $s(n)$ и вычислить соответствующую импульсную характеристику $\lambda(n)$. Функция $s(n)$ определяется экспериментально расчетным путем. Выбирается некоторое множество характерных перепадов яркости в области объекта и выполняется усреднение соответствующих отсчетов яркости. Затем полученные значения делятся на максимально возможное значение яркости (255 при 8-и разрядном представлении цвета). Для случая изображений маркеров характерные перепады яркости имеют трапецеидальную форму (рис. 1*б*). Отсюда, в идеализированном представлении нормированную функцию $s(n)$ можно представить в виде равнобедренной трапеции (рис. 2*а*). При этом соответствующая импульсная характеристика $\lambda(n)$ будет содержать всего 4 значащих отсчета (рис. 2*б*).

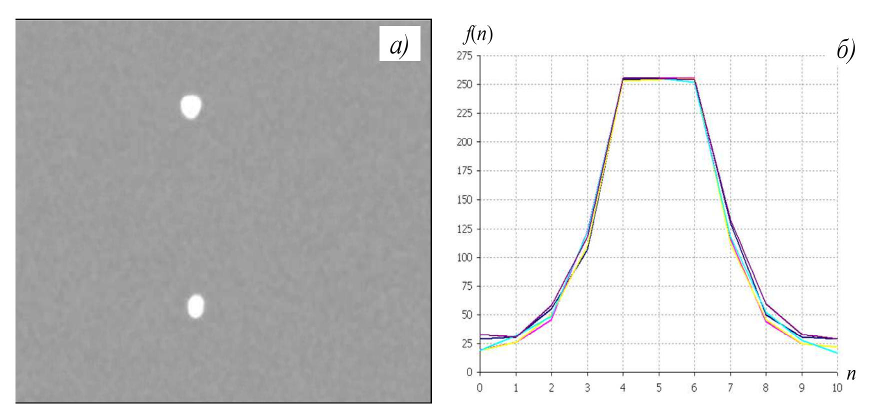


Рисунок 1 – Пример изображения световых маркеров (*а*); характерные перепады яркости в области маркеров (*б*)

Полученная формула согласованно-избирательного фильтра имеет следующий вид:

$$\eta(m)=-f(m-l_2/2)+f(m-l_1/2)+f(m+l_1/2)-f(m+l_2/2), \qquad (12)$$

где l_1, l_2 – длины верхней и нижней основ трапеции идеализированной функции яркости $s(n)$. Синтезированный фильтр имеет достаточно высокую вычислительную эффективность. Для вычисления отклика фильтра в точке достаточно выполнить всего лишь три арифметические операции сложения/вычитания.

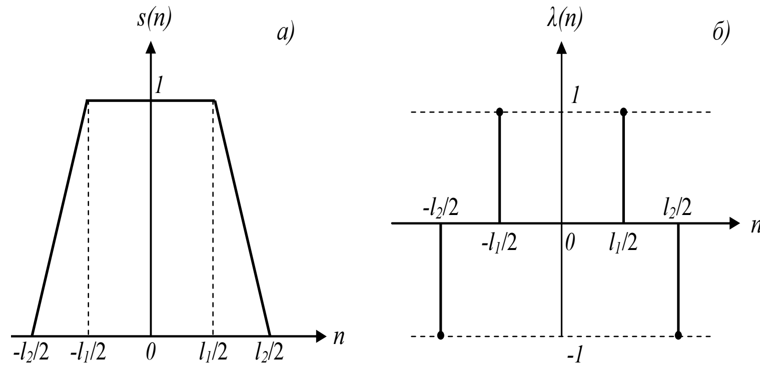


Рисунок 2 – Идеализированная функция яркости $s(n)$ (*а*) и соответствующая импульсная характеристика $\lambda(n)$ (*б*)

Для граничной обработки результатов фильтрации текущего кадра предложено использовать статистические оценки, полученные при фильтрации предыдущего кадра: выборочное среднее $\bar{\eta}$ откликов фильтра и их среднеквадратическое отклонение σ_η. Решающее правило имеет следующий вид:

$$p(m) \in P, \; если \;\; \eta_{max}(m) > \bar{\eta} + \sigma_\eta \cdot k_e, \qquad (13)$$

где $p(m)$ – точка в строке (столбце) изображения с индексом m; P – массив для хранения результатов обработки; k_e – экспериментальный коэффициент. Использование в решающем правиле (13) статистических оценок, полученных на предыдущей итерации обработки, позволяет автоматически подстраиваться под изменяющиеся условия внешней освещенности объекта.

Результаты согласованно-избирательной фильтрации изображений после пороговой обработки представляют собой группы точек, расположенные в области изображений маркеров (рис. 3*а*).

Для каждой из групп точек вычисляется геометрический центр, который принимается в качестве результата распознавания светового маркера (рис. 3*б*).

Далее пары точек p_{11}, p_{12} и p_{21}, p_{22}, найденные на первом и втором изображениях стереопары соответственно, используются для восстановления трехмерных координат двух точек p_1, и p_2, принадлежащих центрам световых маркеров.

Трехмерные координаты двух точек определяют пространственное уравнение прямой и углы ее поворота относительно осей горизонтальной плоскости.

Поскольку взаимное положение между маркерами и точкой, соответствующей концу электрода, известно, то координаты данной точки несложно вычислить с помощью векторных операций.

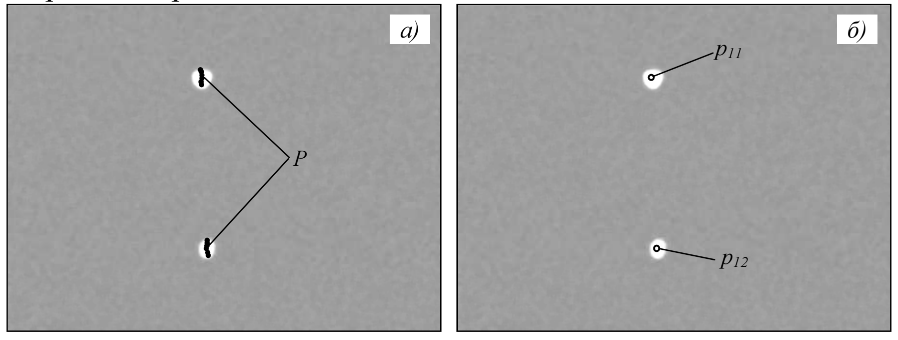


Рисунок 3 – Обработка изображения световых маркеров: результат согласованно-избирательной фильтрации и пороговой обработки (*а*); окончательные результаты распознавания световых маркеров (*б*)

Экспериментальное исследование макета стереоскопической системы для отслеживания траектории движения имитатора сварочной горелки

При построении макета стереоскопической сенсорной системы использованы две Ethernet – видеокамеры разработки ИЭС им. Е.О. Патона и полая прозрачная трубка, в которую вмонтированы два инфракрасных светодиода (рис. 4*а*). Для подавления фонового оптического излучения в оптическом тракте видеокамер применялись светофильтры, пропускающие только излучение инфракрасной области спектра.

Видеокамеры синхронизировались между собой по принципу «ведущий-ведомый». Взаимодействие с видеокамерами и обработка изображений осуществлялись с помощью компьютера.

Также разработана тестовая программа, предназначенная для визуального сопровождения работы стенда (рис. 4*б*). Верхняя часть диалогового окна программы содержит область для визуализации движения трехмерной модели сварочной горелки относительно модели сварочного образца, расположенного в горизонтальной плоскости.

В правой части окна расположена панель для отображения траектории движения «электрода» в плоскости «образца», в левой части – панель для отображения текущих координат «электрода», углов поворота «горелки» относительно осей горизонтальной плоскости и скорости движения.

В ходе экспериментов получено, что разработанная сенсорная система позволяет полностью восстанавливать сложную траекторию движения имитатора сварочной горелки с достаточно высокой точностью.

Даже при небольшой разрешающей способности видеокамер (640×480 пикселей) погрешность восстановления линейных и угловых параметров не превышает ± 1 мм и ± 1° соответственно, что вполне достаточно для обучающих тренажеров-сварщиков.

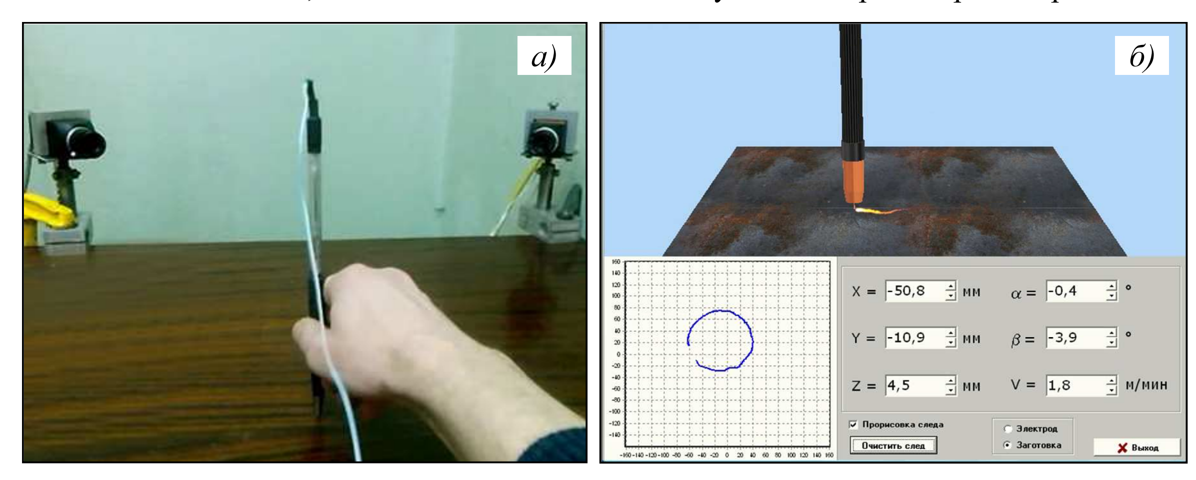


Рисунок 4 – Внешний вид тестового стенда (*а*) и диалоговое окно программы (*б*)

Результаты разработки получили одобрительные отзывы специалистов одного из ведущих предприятий-изготовителей малоамперных сварочных тренажеров. В настоящее время проводятся консультации по разработке опытного образца модернизированного сварочного тренажера, оснащенного стереоскопической сенсорной системой. Принято решение, что для практического применения световые маркеры более целесообразно реализовать с помощью инфракрасных прожекторов и светоотражающих меток. А для снижения вычислительной нагрузки на компьютер тренажера обработка изображений должна выполняться микропроцессорными Контроллерами, встроенными в видеокамеры.

Выводы

Применение стереоскопического отслеживания траектории движения имитатора сварочной горелки позволит существенно расширить функциональность тренажеров-сварщиков за счет использования прямого метода измерения углового и линейного положения сварочного инструмента в процессе обучения или аттестации сварщиков. Измерение полной траектории движения с метками времени дает воз-

можность дополнительно определять вылет электрода, отклонения электрода от линии стыка, амплитуду и частоту колебаний имитатора сварочной горелки и все компоненты вектора скорости сварки.

Литература

1. Васильев В.В. Дуговой тренажер сварщика / [В.В. Васильев и др.] // Электронное моделирование. – 1994. – № 16. – С. 94-97.
2. Цифровая обработка изображений в информационных системах : [учебн. пособие] / [И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых и др.] . – Новосибирск : НГТУ, 2000. – 155 с.
3. Кисилевский Ф.Н. Калибровка триангуляционных оптических сенсоров / Ф.Н. Кисилевский, В.А. Коляда // Автомат. сварка. – 2005. – № 5. – С. 57-58.
4. Форсайт Д.А. Компьютерное зрение. Современный подход / Дэвид А. Форсайт, Джин Понс. – М. : «Вильямс», 2004. – С. 928.

Literatura

1. Vasilev V.V. Dugovoy trenazher svarschika / [V.V. Vasilev i dr.] // Elektronnoe modelirovanie. – 1994. – № 16. – S. 94-97.
2. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v informatsionnyih sistemah : [ucheb. posobie] / [I.S. Gruzman, V.S. Kirichuk, V.P. Kosyih i dr.] . – Novosibirsk : NGTU, 2000. – 155 s.
3. Kisilevskiy F.N. Kalibrovka triangulyatsionnyih opticheskih sensorov / F.N. Kisilevskiy, V.A. Kolyada // Avtomat. svarka. – 2005. – № 5. – S. 57-58.
4. Forsayt D.A. Kompyuternoe zrenie. Sovremennyiy podhod / Devid A. Forsayt, Dzhin Pons. – M. : «Vilyams», 2004. – S. 928.

E.V. Shapovalov, V.A. Kolyada

Stereoscopic Tracking of the Torch Trajectory for Welding Training Apparatus

This article describes a method for improving the existing low-amperage arc welder trainers by the use of stereoscopic tracking of the simulated welding torch.

A mathematical model of the stereoscopic sensor system, which allows on the base of point projections on a stereo pair images to restore its spatial coordinates, is formulated.

Fast digital image processing algorithms for detecting the light markers is developed. The algorithms are based on mathematical apparatus in concert-selective filtering and thresholding images.

The test bench which includes two Ethernet-cameras, a welding torch simulator with two light markers, computer and test software is prepared. Experimental investigation of stereoscopic system, in which established, that the system allows to recover a welding torch simulator complex trajectory with high accuracy, is performed.

The use of stereoscopic vision system can significantly extend of the welder trainers functionality by using the direct measuring method of the angular and linear welding tool position in welders training or certification.

Статья поступила в редакцию 19.04.2013.